

鉄系超伝導体における構造揺らぎの量子臨界性と超伝導性

鉄系超伝導体は銅系酸化物超伝導体に次ぐ高い臨界温度 (T_{sc}) を有し、将来の応用に向けて、世界中で精力的な研究が行われている。鉄系超伝導体では、非超伝導体の母物質に静水圧を加えることや、元素置換によって超伝導が出現することが知られている。典型的な鉄系超伝導体の母物質である 122 系 $BaFe_2As_2$ では、 $T_s=140K$ に構造の変化を伴う磁気秩序が発現する。この物質では、Fe を Co、Ba を K、As を P にそれぞれ置換することにより、磁気秩序が次第に消滅し、代わって超伝導が発現する。固体には温度を冷やすにつれて徐々に硬くなってゆくという性質があるが、鉄系超伝導体では、不思議なことに超伝導に隣接する秩序の前駆現象として、低温になるにつれて柔らかくなることが知られていた。超伝導相はこの秩序相と隣接することから、磁気秩序や構造秩序と超伝導との関係が示唆されていたが、この異常な弾性的性質が超伝導の発現とどのように関わっているのかは明らかではなかった。

今回、岩手大学大学院工学研究科フロンティア材料機能工学専攻の吉澤正人教授の研究グループは(独)産業技術総合研究所等の研究グループと東京大学大学院理学研究科の研究グループと共同で、固体が柔らかくなることと超伝導の発現との間に密接な関係があることを明らかにした。研究グループは、鉄系超伝導体の一種である $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ のさまざまなコバルト組成 (x) の純良大型単結晶について、正方形から斜方晶への結晶変形に対応する弾性定数 C_{66} の詳細な研究を行った(図1)。その結果、構造秩序を示さない Co の濃度 ($x>0.07$) では、 C_{66} の逆数で構造揺らぎの指標である弾性コンプライアンス S_{66} ($=1/C_{66}$) が、 T_{sc} が最大となる組成で最も大きくなることを発見した(図2中の S_{66} の異常部分の極大値)。また、 S_{66} が磁氣的量子臨界点近傍で予想される磁化率の特徴と極めてよく似た振る舞いを示すことなどから、近年大きく進展した磁性に関する量子相転移の研究成果を基礎に、筆者等は固体の構造揺らぎが量子臨界性を示す最初の例として、これを「構造的量子臨界現象」と名づけ、構造揺らぎが超伝導の発現に関与することを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2012 年 2 月号に掲載された。

鉄系超伝導体で観測された極めて大きな弾性異常は、弾性異常をもたらす原因と弾性歪との強い相互作用を示唆する。同様の巨大な弾性異常は実用超伝導材料である Nb_3Sn や V_3Si などでも知られていた。これらの物質でも弾性異常と超伝導との関係が注目されたが、フォノンを媒介とする超伝導発現機構は高い T_{sc} は期待できないこと、銅系酸化物超伝導などの発見によって、実用材料としての価値は別として、超伝導と弾性異常との関係は解明されないまま、歴史の中に埋もれてしまった。しかし、構造揺らぎの起源がバンドや軌道など高いエネルギー尺度に起因するとしたら、高い T_{sc} が実現する可能性がある。この論文で示された実験結果は出版前から多くの理論家を刺激し、さまざまな議論が展開されている。現在、鉄系超伝導体の弾性異常の原因として軌道の関与が有力視されており、今回の成果は軌道揺らぎを媒介とする超伝導の発現機構を支持するものである。

本論文で見いだされた構造的量子臨界現象は、鉄系超伝導体の物性の解明ばかりでなく、構造揺らぎと超伝導の関係という長い歴史に新たな光を当てるきっかけとなるかも知れない。銅系酸化物超伝導体では出会わなかった多軌道・多バンド系の研究を通して、新しい機構による、より高い温度での超伝導の発現が期待されている。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn 81 (2012) No. 2, p. 024604

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/024604> (1月27日公開済)

<情報提供：吉澤正人、中西良樹（岩手大学大学院工学研究科）、
永崎 洋、李 哲虎（産業技術総合研究所）>

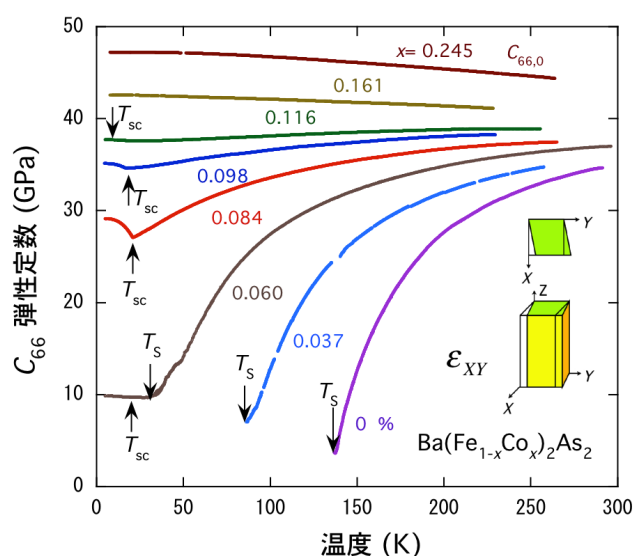


図1 正方晶から斜方晶への構造揺らぎに対応する弾性定数 C_{66} ($=1/S_{66}$) の温度依存性。

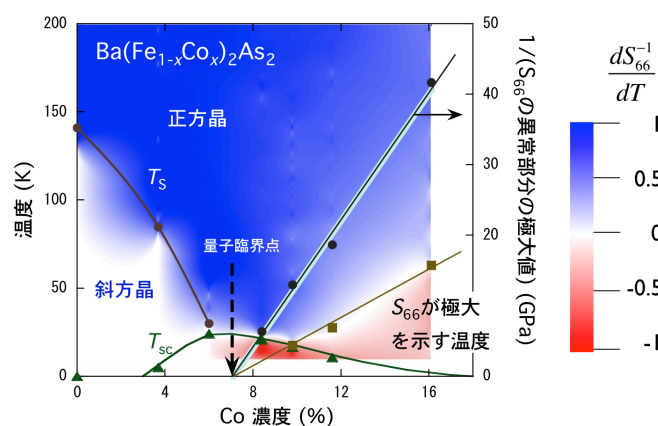


図2 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ の相図。構造揺らぎの指標 (S_{66} の異常部分の極大値) は量子臨界点に向かって発散的に増大し、超伝導転移温度も最大となる。